Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*Факультет заочного обучения*

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

# «ФИЗИКА»

Курс I, II

*Специальности:* 012600 Метеорология;
012700 Гидрология; 012800 Океанология;
320300 Геоэкология; 060300 Экономика природопользования

*Подлежит возврату*
*на факультет заочного обучения*

РГГМУ

Санкт-Петербург
2010

Лабораторный практикум по дисциплине «Физика». – СПб.: РГГМУ, 2010. – 58 с.

*Авторы*: М.М. Белов, канд. техн. наук, доцент, В.В. Косцов, ст. преп., Т.Ю. Яковлева, канд. физ-мат. наук, доцент, П.П. Хлябич, канд. физ-мат. наук, доцент.

*Ответственный редактор*: А.П. Бобровский, канд. физ-мат. наук, зав. каф. физики РГГМУ.

Лабораторный практикум содержит 8 лабораторных работ курса физики по разделам "Механика", "Молекулярная физика", "Постоянный и переменный ток", "Оптика", "Тепловое излучение". Предназначен для студентов первого и второго курсов заочной формы обучения по специальностям: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология и экономика природопользования.

## Общие указания

Учебно-методическое пособие содержит восемь лабораторных работ по разделам курса физики в соответствии с государственным образовательным стандартом по специальностям: метеорология, гидрометеорология, океанология, геоэкология и экономика природопользования.

Студенты первого курса выполняют лабораторные работы № № 101, 104, 148. Студенты второго курса – № № 201, 226, 301, 306, 312. Нумерация работ обусловлена спецификой нумераций, используемых на кафедре физики РГГМУ.

Перед выполнением лабораторных работ необходимо самостоятельно изучить тему "Погрешности при измерении физических величин" (см. "Приложение" данного пособия).

Измерения физических величин в данных работах проводятся на кафедре физики под руководством лаборанта кафедры.

Выполнив измерения и произведя необходимые расчеты, студент оформляет отчет, который сдается на кафедру физики для проверки. Все лабораторные работы оформляются в *одной тетради.* На титульном листе указать фамилию, имя, отчество, факультет и номер группы (рецензия не нужна). Отчет должен содержать разделы в следующем порядке:

1. Номер и наименование лабораторной работы.
2. Задача работы.
3. Схема установки.
4. Рабочие формулы. Приводятся *только* формулы, по которым рассчитываются физические величины в данной работе (ссылаться на пункт "Обработка результатов измерений").
5. Таблица измерений.
6. Расчет погрешностей прямых измерений.
7. Расчет физических величин и их погрешностей.

## *Лабораторная работа № 101*
## *ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ КОЛЬЦА МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ*

1. Задача работы.

1.1. Определение момента инерции кольца.

2. Предварительные сведения.

Моментом инерции материальной точки относительно оси вращения называется произведение массы этой точки $m$ на квадрат расстояния $r$ от нее до оси вращения:

$$I = mr^2.$$

Физический смысл момента инерции – момент инерции характеризует инертные свойства тела при вращательном движении. (Инерция – способность тела сохранять свою скорость постоянной.)

Момент инерции твердого тела можно получить суммированием моментов инерций материальных точек, составляющих это тело:

$$I_m = \sum m_i r_i^2 .$$

Для тел сложной формы определение момента инерции производится методами интегрального исчисления:

$$I_m = \int_V r^2 dm .$$

Решая этот интеграл для симметричных тел, когда ось вращения совпадает с осью симметрии (проходит через центр массы), получаем моменты инерции:
цилиндра:

$$I = \frac{1}{2} mR^2; \qquad R \text{ – радиус цилиндра;}$$

шара:

$$I = \frac{2}{5} mR^2; \qquad R \text{ – радиус шара;}$$

тонкого стержня (относительно оси, проходящей через его центр и перпендикулярной к стержню):

$$I = \frac{1}{12} ml^2; \qquad l \text{ – длина стержня.}$$

В случае, если ось вращения не проходит через центр массы, а параллельно смещена на расстояние $d$, то момент инерции тела определяется по теореме Штейнера:

$$I = I_0 + md^2,$$

где $I_0$ – момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр массы; $m$ – масса тела.

3. Метод исследования и описание установки.

В данной работе определяется момент инерции кольца с помощью измерения периода крутильных колебаний $T$. Для тела с моментом инерции $I$ период крутильных колебаний определяется по формуле:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}}, \tag{1}$$

где $k$ – модуль кручения нити. Величина "$k$" находится путем измерения периода колебаний $T_0$ эталонного тела с известным моментом инерции $I_0$.

На рис. 1. представлен прибор, используемый в данной работе. В качестве эталонного тела взят диск с массой $m$ и диаметром $D$. Его момент инерции:

$$I_0 = \frac{1}{8} mD^2. \tag{2}$$

После измерения периода колебаний $T_0$ диска, зная из формулы (2) момент инерции этого диска $I_0$, можно по формуле (1) найти модуль кручения нити $k$. Далее, поместив на диск кольцо, момент инерции которого, относительно оси, совпадающей с нитью, равен $I$, получим систему тел, момент инерции $I_1$ которой равен сумме моментов инерции диска $I_0$ и кольца $I$:

$$I_1 = I_0 + I. \tag{3}$$

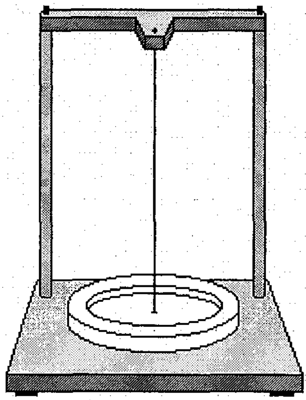


Рис. 1. Схема установки.

Измерив период колебаний системы диск-кольцо $T_1$, находим момент инерции этой системы $I_1$ по формуле, полученной на основе соотношения (1):

$$I_1 = I_0\left(\frac{T_1}{T_0}\right)^2. \qquad (4)$$

Тогда: $$I = I_1 - I_0,$$

или $$I = I_0\left(\frac{T_1^2}{T_0^2} - 1\right).$$

С учетом формулы (2), получаем момент инерции кольца $I$:

$$I = \frac{mD^2}{8}\left(\frac{T_1^2}{T_0^2} - 1\right). \qquad (5)$$

Если $t_0$ – время, за которое совершается $N$ колебаний диска, а $t_1$ – время того же числа колебаний системы диск-кольцо, то период колебаний диска $T_0$ и период колебаний системы диск-кольцо $T_1$ определяются следующим образом:

$$T_0 = \frac{t_0}{N}; \qquad T_1 = \frac{t_1}{N},$$

и, значит, момент инерции кольца $I$ равен:

$$I = \frac{mD^2}{8}\left(\frac{t_1^2}{t_0^2} - 1\right), \qquad (6)$$

где: $m$ – масса диска; $D$ – диаметр; $t_0$ – время, за которое совершается $N$ колебаний диска; $t_1$ – время, за которое совершается $N$ колебаний системы диск-кольцо.

Формула (6) является рабочей формулой для расчета момента инерции кольца $I$.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Измерьте штангенциркулем диаметр диска 3 раза. Результаты занесите в таблицу.

4.2. Сообщите диску крутильные колебания. Несколько первых колебаний пропустите, затем измерьте время $t_0$ десяти полных колебаний. Опыт повторите 5 раз. Результаты занесите в таблицу.

4.3. Наденьте на диск кольцо и для системы диск-кольцо измерьте время $t_1$ десяти полных колебаний, как указано в пункте 4.2. Обратите внимание на то, что число полных колебаний $N$ при измерениях $t_0$ и $t_1$ должно быть обязательно одинаковым.

4.4. Занесите в таблицу массу диска, которая указана на установке.

*Таблица*

| № опыта | $t_0$, с | $t_1$, с | $D$, м | $m$, кг | $\Delta m$, кг |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

5. Обработка результатов наблюдений.

5.1. Рассчитайте средние значения наблюдаемых величин $t_0$, $t_1$ и $D$ по формуле $(2^*)$[1].

5.2. Найдите случайные погрешности $\varepsilon(t_o), \varepsilon(t_1), \varepsilon(D)$ по формуле $(3^*)$ и систематические погрешности $\Theta(t_o), \Theta(t_1), \Theta(D)$ по формуле $(4^*)$. (Для секундомера $h$ = 0,6 с, $C_{\min}$= 0,2 с; для штангенциркуля $h$ = 0,1 мм, $C_{min}$= 0,1 мм). Причем $\Theta(t_o) = \Theta(t_1)$.

[1] Здесь и далее – значок * указывает ссылку на формулу из приложения.

5.3. Определите абсолютные погрешности $\Delta t_o, \Delta t_1, \Delta D$ по формуле (6*) и записать окончательный результат измерения величин $t_0$, $t_1$ и $D$.

5.4. Вычислите момент инерции кольца $I$ по формуле (6).

5.5. Найдите относительную погрешность $\delta I$ :

$$\delta I = \sqrt{\delta I_m^2 + \delta I_D^2 + \delta I_{t_o}^2 + \delta I_{t_1}^2}\ ,$$

$$\delta I_m = \frac{\Delta m}{m};\ \delta I_D = \frac{2\Delta D}{D};\ \delta I_{t_o} = \frac{2t_1^2 \Delta t_0}{(t_1^2 - t_0^2)\, t_0};\ \delta I_{t_1} = \frac{2t_1 \Delta t_1}{(t_1^2 - t_0^2)}.$$

Абсолютная погрешность массы $\Delta m$ определяется как погрешность табличного значения (см. “Приложение”).

5.6. Рассчитайте абсолютную погрешность косвенного измерения $I$:

$$\Delta I = I \cdot \delta I\ .$$

5.7. Запишите окончательный результат.

## 6. Контрольные вопросы.

6.1. Сформулируйте основной закон динамики для вращательного движения.
6.2. Что такое момент инерции и от чего он зависит?
6.3. Какую роль при вращательном движении играет момент инерции тела?
6.4. Что такое угловое ускорение и как найти его направление?
6.5. Что такое момент силы относительно неподвижной оси вращения?
6.6. В чем заключается теорема Штейнера?

## 7. Литература.


7.1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. (В 5 кн.) – М.: Наука, 1998. - т. 1 «Механика» – § 5.1–5.4.
7.2. *Зисман Г.А., Тодес О.М.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1974. – т.1, гл. 3, §10, 11.
7.3. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука. Физматлит. – 1996. – гл.1.4 – § 1.4.1. – 1.4.4.

## *Лабораторная работа № 104*
## *ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЁСТКОСТИ МЕТОДОМ ПРУЖИННОГО МАЯТНИКА*

1. Задача работы.

1.1. Определение коэффициента жесткости пружины.

2. Предварительные сведения.

Под действием внешних сил $F$ всякое реальное тело деформируется, то есть изменяет свои размеры и форму. Если после прекращения действия сил тело принимает первоначальные размеры и форму, то деформация называется упругой.

Простейшим видом упругой деформации твердого тела является деформация растяжения (сжатия). Рассмотрим такой вид деформации на примере растяжения пружины. Такая деформация возникает, если один конец пружины неподвижно закреплен, а к другому концу приложена внешняя сила $F$, направленная по оси пружины.

В состоянии равновесия сила тяжести груза, подвешенного за свободный конец пружины, будет уравновешена упругими силами $F_{\text{упр}}$, возникающими в пружине в результате деформации.

При этом величина деформации $X$ (полное удлинение) пропорциональна величине действующей силы $F$. Закон Гука:

$$F_{\text{упр}} = F = kX \tag{1}$$

где $k$ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом жесткости пружины.

3. Описание установки.

В установке используется упругая пружина, один конец которой закреплен, а другой, вместе с подвешенным к пружине грузом, может двигаться относительно линейки. На пружине закреплён визир, который позволяет фиксировать положение конца пружины при различных значениях внешней силы.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Отметьте на шкале линейки положение указателя на пружине без грузов $L_0$.

4.2. Нагружая пружину грузами с различными массами $m$, определите на шкале соответствующие положения указателя $L$.

4.3. Результаты отсчетов по пунктам 4.1 – 4.2 занесите в таблицу.

*Таблица*

| № опыта | $m$, кг | $F$, Н | $L_0$, м | $L$, м | $X$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| | | | | | |

5. Обработка результатов измерений.

5.1. Рассчитайте систематическую погрешность линейки $\Theta(L)$ по формуле (4*). Предел погрешности линейки $h$ = 1 мм, цена минимального деления шкалы $C_{min}$=1 мм.

Абсолютные погрешности $\Delta L_0$ и $\Delta L$ равны систематической погрешности. Абсолютная погрешность массы $\Delta m$ определяется как погрешность табличного значения (см. "Приложение").

5.2. Вычислите удлинения пружины, соответствующие каждой массе, по формуле:

$$X_i = L_i - L_0,$$

и запишите результаты в таблицу.

5.3. Определите абсолютную погрешность $\Delta X$ по формуле:

$$\Delta X = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta L_0^2}.$$

Эта погрешность будет одинакова для всех значений $X$.

5.4. Рассчитайте значения силы тяжести $F$ для каждого груза:

$$F_i = m_i g,$$

где: $m_i$ – масса груза; $g$ = (9,80 ± 0,05) м/с$^2$ – ускорение свободного падения.

5.5. Найдите относительные погрешности $\delta F_i$ и абсолютные погрешности $\Delta F_i$ для каждого значения силы $F$:

$$\delta F_i = \sqrt{\delta F_m^2 + \delta F_g^2}\ ;$$

$$\delta F_m = \frac{\Delta m_i}{m_i}\ ;\ \delta F_g = \frac{\Delta g}{g}\ ;$$

$$\Delta F_i = F_i \cdot \delta F_i\ .$$

5.6. Постройте график зависимости внешней силы $F$ от удлинения пружины $X$.

5.7. Определите значение углового коэффициента $a$ и его абсолютную погрешность $\Delta a$. (Правила построения графиков и их обработку см. “Приложение”).

5.8. Учитывая, что коэффициент жесткости $k$ равен угловому коэффициенту $a$, а абсолютная погрешность $\Delta k$ равна $\Delta a$, запишите окончательный результат измерения коэффициента жесткости пружины.

## 6. Контрольные вопросы.

6.1. Какие виды деформации Вы знаете?
6.2. О чём говорит закон Гука?
6.3. Какие силы называются упругими, квазиупругими?
6.4. Дайте определение периода колебаний.
6.5. Какие колебания являются гармоническими и зависят ли они от амплитуды?

## 7. Литература.

7.1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. (В 5 книгах) – М.: Наука, 1998. - т. 1 «Механика» - гл.2 § 2.9, гл.3 § 3.3, гл.8 § 8.1, 8.4.
7.2. *Зисман Т.А., Тодес О.И.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1967.

## Лабораторная работа № 148
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ

1. Задача работы.

1.1. Измерение коэффициента вязкости жидкости.

2. Предварительные сведения.

Пусть в покоящемся газе или жидкости движется тело с небольшой скоростью (гораздо меньше средней скорости теплового хаотического движения молекул). В своем движении тело увлекает за собой прилегающий к нему слой газа или жидкости (эффект "прилипания"), который в свою очередь увлекает за собой следующий слой, и т. д. Таким образом, весь газ или жидкость делится на тончайшие слои, скользящие тем медленнее, чем дальше они находятся от движущегося тела. Такое течение с параллельным перемещением слоев, называется ламинарным. Уменьшение скоростей слоев в зависимости от их расстояния от тела происходит из-за наличия вязкости, т.е. сил внутреннего трения. Причина возникновения внутреннего трения заключается в том, что вследствие теплового движения молекул происходит обмен молекул между слоями, в результате чего молекулы, переходящие из слоя, движущегося с большей скоростью, в слой с меньшей скоростью, переносят с собой импульс того слоя, из которого они вышли. Тем самым они увеличивают импульс упорядоченного движения медленного слоя. И наоборот, молекулы медленного слоя переходят в быстрый слой и уменьшают импульс быстрого слоя. Макроскопически это проявляется как действие трения между слоями.

Сила трения описывается законом Ньютона:

$$F = -\eta \frac{dv}{dx} S, \qquad (1)$$

где: $F$ – касательная (тангенциальная) сила, вызывающая сдвиг слоев жидкости (газа) относительно друг друга; $S$ – площадь слоя, по которому происходит сдвиг; $\frac{dv}{dx}$ – градиент скорости течения (быстрота изменения скорости течения от слоя к слою); $\eta$ – коэффициент вязкости или просто вязкость.

Коэффициент вязкости характеризует сопротивление жидкости (газа) смещению ее слоев. Единицей вязкости в системе СИ является [Па·с] (Паскаль умножить на секунду). В условиях установившегося ламинарного течения при постоянной температуре вязкость газов или жидкостей – постоянная величина. Она зависит от химической структуры молекул, температуры и давления, и не зависит от градиента скорости.

В частном случае движения в жидкости тел сферической формы закон Ньютона преобразуется к виду:

$$F = -6\pi\eta r v\,, \qquad (2)$$

где: $r$ – радиус шара; $v$ – его скорость.

Эта формула носит название закона Стокса.

При движении шарика в вязкой среде на него действуют три силы: сила тяжести, сила Архимеда и сила Стокса. Если написать уравнение сил и выразить из него $\eta$, то получим рабочую формулу для определения коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{gd^2(\rho-\rho_0)\cdot t}{18S}\,, \qquad (3)$$

где: $g$ – ускорение свободного падения;

$d$ – диаметр шарика;

$\rho$ – его плотность;

$\rho_0$ – плотность жидкости;

$S$ – путь, пройденный шариком;

$t$ – время прохождения этого пути.

3. Описание установки.

Экспериментальная установка представляет собой прозрачный цилиндр с делениями, нанесенными через 10 см. Цилиндр заполнен исследуемой вязкой жидкостью (маслом). Шарик – свинцовая дробинка.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Определите диаметр шарика $d$ с помощью штангенциркуля. Результат измерения занесите в таблицу.

4.2. Определите путь $S$, который должен пройти шарик (постоянная скорость шарика устанавливается уже к отметке "0"). Рекомендуется расстояние $S$ взять равным 70 – 80 см.

4.3. Измерьте время $t$ прохождения шариком выбранного пути. Для этого шарик закладывается в желобок, нанесенный на крышке, прикрывающей цилиндр, откуда он скатывается к оси цилиндра и падает в масло. Секундомер включают в тот момент, когда шарик проходит отметку "0", и останавливают его, когда шарик проходит последнюю выбранную отметку.

4.4. Опыт повторите 5 раз с разными шариками.

4.5. Данные занесите в таблицу.

*Таблица*

| № | $d$, м | $t$, с | $S$, м | $\eta$, Па·с |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| | | | | $\eta_{\text{среднее}}$ |

5. Обработка результатов измерений.

5.1. Рассчитайте систематические погрешности результатов всех прямых измерений $\Theta(d)$ и $\Theta(t)$ по формуле (4*). (Для секундомера $h$ = 0,03 с, $C_{\min}$= 0,01 с; для штангенциркуля $h$ = 0,1 мм, $C_{\min}$= 0,1 мм). а $\Theta(S)$ по формуле: $\Theta(S) = 1{,}1h$ ($h$ = 1 мм).

5.2. Абсолютные погрешности диаметра шарика $d$, времени $t$ и пути $S$ принять равными их систематическим погрешностям:

$$\Delta d = \Theta(d);\quad \Delta t = \Theta(t);\quad \Delta S = \Theta(S).$$

5.3. По результатам каждого опыта по формуле (3) вычислите коэффициент вязкости жидкости $\eta_i$ ($i$ – номер опыта). Плотность вещества шарика $\rho = (11340{,}0 \pm 0{,}5)$ кг/м$^3$, жидкости $\rho_o = (1080{,}0 \pm 0{,}5)$ кг/м$^3$, ускорение свободного падения $g = (9{,}80 \pm 0{,}05)$ м/с$^2$.

5.4. Найдите среднее арифметическое значение коэффициента вязкости $\eta_{ср}$.

5.5. Рассчитайте относительную погрешность $\delta\eta$ как погрешность косвенного измерения:

$$\delta\eta = \sqrt{\delta\eta_g^2 + \delta\eta_d^2 + \delta\eta_\rho^2 + \delta\eta_{\rho_o}^2 + \delta\eta_S^2 + \delta\eta_t^2},$$

где: $\delta\eta_g = \dfrac{\Delta g}{g}$; $\delta\eta_d = \dfrac{2\Delta d}{d}$; $\delta\eta_\rho = \dfrac{\Delta\rho}{(\rho - \rho_0)}$; $\delta\eta_{\rho_0} = \dfrac{\Delta\rho_0}{(\rho - \rho_0)}$;

$\delta\eta_S = \dfrac{\Delta S}{S}$; $\delta\eta_t = \dfrac{\Delta t}{t}$.

При расчете используйте значения $d$ и $t$ из опыта, для которого значение $\eta$ наиболее близко к $\eta_{cp}$.

5.6. Определите абсолютную погрешность $\Delta\eta$:

$$\Delta\eta = \eta_{cp} \cdot \delta\eta,$$

и запишите окончательный результат в виде:

$\eta = \eta_{cp} \pm \Delta\eta$.

## 6. Контрольные вопросы.

6.1. Каковы причины возникновения сил внутреннего трения в жидкости?
6.2. Запишите и объясните формулу Ньютона.
6.3. Каков физический смысл коэффициента вязкости?
6.4. От каких параметров зависит коэффициент вязкости?
6.5. Запишите закон Стокса и сформулируйте условия его выполнения.

## 7. Литература.

7.1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. (В 5 книгах) – М.: Наука, 1998. - т. 3. «Молекулярная физика и термодинамика» - § 7.1, 7.2, 7.5.
7.2. *Зисман Г.А., Тодес О.М.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1974, т. 1, гл. 11, п. 45, стр. 230 – 233.
7.3. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука. Физматлит. – 1996.- гл.II.6. - § II.6.3.

## *Лабораторная работа № 201*
## *ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА*

1. Задачи работы.

1.1. Проверка выполнения 2-го закона Кирхгофа для цепи переменного тока.

1.2. Измерение реактивных $X_L$ и $X_C$ и активного $R$ сопротивлений элементов цепи.

1.3. Измерение величин индуктивности катушки $L$ и ёмкости конденсатора $C$.

1.4. Измерение полного импеданса цепи $Z$.

1.5. Измерение величины $\cos\varphi$.

1.6. Измерение мощности, выделяющейся во внешней цепи $P$.

2. Предварительные сведения.

Электрический ток, сила которого изменяется по синусоидальному закону во времени и меняет знак (направление) дважды за период, называется переменным током:

$$i = I_m \sin(2\pi f t + \varphi_0), \tag{1}$$

где $I_m$ – амплитудное значение переменного тока, $f$ – частота переменного тока, $\varphi_0$ – начальное значение фазы колебаний. В дальнейшем будем полагать, что $\varphi_0 = 0$.

Всякая реальная электрическая цепь состоит из сопротивлений, катушек и конденсаторов. Механизм прохождения переменного электрического тока через каждый из этих элементов различен и поэтому расчёт напряжения на этих элементах ведётся не только с использованием закона Ома, но и других физических законов.

При прохождении переменного тока через активное сопротивление $R$ мгновенное напряжение на нём $U_R$ можно определить по формуле:

$$U_R = i\,R\,. \tag{2}$$

Подставляя в формулу (2) выражение (1), получим:

$$U_R = I_m R \sin 2\pi f t = U_{Rm} \sin 2\pi f t\,; \tag{3}$$

где $U_{Rm}$ – амплитудное значение напряжения $U_R$.

Мгновенные значения напряжений $U_L$ и $U_C$ переменного тока на катушке с индуктивностью $L$ и на конденсаторе ёмкостью $C$ можно рассчитать по формулам:

$$U_L = U_{Lm} \sin\left(2\pi f t + \frac{\pi}{2}\right), \tag{4}$$

$$U_C = U_{Cm} \sin\left(2\pi f t - \frac{\pi}{2}\right), \tag{5}$$

где $U_{Lm}$– амплитудное значение напряжения $U_L$, $U_{Cm}$ – амплитудное значение напряжения $U_C$.

При сравнении уравнений (1), (3), (4) и (5) между собой, можно заметить, что на активном сопротивлении $R$ мгновенные значения токов $I_R$ и напряжений $U_R$ меняются синхронно, т.е. одновременно, тогда как напряжение на катушке индуктивности $U_L$ опережает ток по фазе на $\frac{\pi}{2}$, а напряжение на конденсаторе $U_C$, отстаёт от него по фазе на $\frac{\pi}{2}$.

Элементы электрической цепи, для которых имеет место сдвиг фаз между током и напряжением, называются *реактивными сопротивлениями* в отличие от активного сопротивления, у которого нет сдвига фаз. В дальнейшем будем рассматривать сдвиг по фазе напряжения на реактивном сопротивлении ($X_L$ или $X_C$) относительно напряжения на активном сопротивлении $R$, которое, как уже указывалось, совпадает по фазе с силой тока.

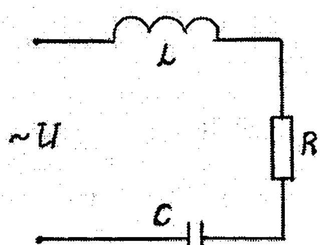



Рис. 1. Последовательное соединение элементов цепи переменного тока.

Обычные электроизмерительные приборы (вольтметры, амперметры) позволяют измерять эффективные значения напряжений $U_э$ и токов $I_э$.

Эффективные и амплитудные значения токов и напряжений связаны соотношениями:

$$I_m = \sqrt{2}\, I_э\,; \qquad\qquad U_m = \sqrt{2}\, U_э\,. \tag{6}$$

Измеряя эффективные значения силы тока и напряжения, можно определить величину $R$ по формуле:

$$R = \frac{U}{I}. \tag{7}$$

Аналогично можно найти величины индуктивного сопротивления $X_L$ и ёмкостного сопротивления $X_C$:

$$X_L = \frac{U_L}{I}; \tag{8}$$

$$X_C = \frac{U_C}{I}. \tag{9}$$

Обращаем внимание на то, что величины $X_L$ и $X_C$ связывают между собой эффективные (но не мгновенные) значения силы тока и напряжения. Величины индуктивного и ёмкостного сопротивлений измеряются, подобно активному сопротивлению, в Омах. Зная величины $X_L$ и $X_C$, можно найти такие параметры элементов цепи, как ёмкость конденсатора $C$ и индуктивность катушки $L$:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}; \tag{10}$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}. \tag{11}$$

Для мгновенных значений силы тока и напряжения выполняются законы Кирхгофа. Так, например, для цепи, изображённой на рис. 1., второй закон Кирхгофа можно записать в виде:

$$\vec{U} = \vec{U}_L + \vec{U}_R + \vec{U}_C\,, \tag{12}$$

где $U_L$, $U_R$, $U_C$ – мгновенные напряжения на катушке, сопротивлении и конденсаторе соответственно; $\vec{U}$ – мгновенное напряжение на входе электрической цепи (сетевое напряжение).

Так как значения напряжений на катушке индуктивности $U_L$ опережает, а на конденсаторе $U_C$ отстаёт от значения напряжения на активном сопротивлении $U_R$, то отсюда следует, что для амплитудных значений:

$$U_m \neq U_{Lm} + U_{Rm} + U_{Cm}. \tag{13}$$

Математический вывод второго закона Кирхгофа для цепи переменного тока достаточно сложен из-за необходимости учёта фазовых сдвигов, поэтому обычно проверку этого закона проводят графически, построением векторной диаграммы (рис. 2).

При построении такой диаграммы мгновенное напряжение переменного тока на каждом элементе изображается вектором, длина которого равна амплитудному значению напряжения на рассматриваемом элементе цепи.

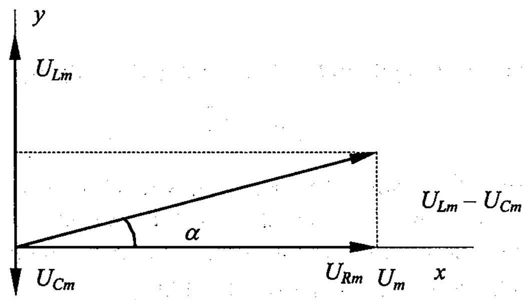



Рис. 2. Векторная диаграмма для цепи, изображённой на рис. 1.

В начальный момент времени ($t$ = 0) вектор $U_R$ направлен вдоль оси $x$, вектор $U_L$ повёрнут относительно $U_R$ на π/2 и опережает его. Следовательно, в начальный момент времени направление вектора $U_L$ совпадает с положительным направлением оси $y$. Вектор $U_C$ также повёрнут относительно $U_R$ на π/2, но отстаёт от него; таким образом, направление вектора $U_C$ совпадает с отрицательным направлением оси $y$. Внешнее напряжение $U$ можно рассчитать, если найти векторную сумму векторов $U_R$, $U_C$ и $U_L$. Длина этого вектора равна амплитуде внешнего напряжения, подаваемого на схему, а величина проекции вектора $U$ на ось $x$ равна мгновенному значению $U$ в начальный момент времени. Мгновенное значение величины входного напряжения в любой момент времени можно определить по формуле:

$$U = U_m \sin(2\pi ft + \varphi), \tag{14}$$

где $\varphi$ – начальный сдвиг фазы входного напряжения относительно напряжения на активном сопротивлении $R$.

Как видно из рис.2, амплитудные значения напряжения на элементах цепи и внешнего напряжения связаны соотношением:

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}\ , \tag{15}$$

которое является следствием второго закона Кирхгофа для амплитудных значений напряжений в цепи переменного тока. Из рис. 2 можно также найти начальный сдвиг фазы входного напряжения относительно напряжения на активном сопротивлении; обычно определяют не сам угол $\varphi$, а его функцию $\cos\varphi$:

$$\cos\varphi = \frac{U_{Rm}}{U_m}\ . \tag{16}$$

Если разделить уравнение (15) на величину $I_m$, то получим:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}\ . \tag{17}$$

Величина $Z$ называется импедансом цепи и имеет смысл полного сопротивления цепи, изображённой на рис. 1.

Мгновенное значение мощности, выделяющейся в цепи переменного тока, можно рассчитать по формуле:

$$P = iU\ . \tag{18}$$

Практический интерес представляет среднее по времени значение мощности $\overline{P}$, которое рассчитывается как среднее значение мощности за один период выделяющейся на активном сопротивлении $R$. Наличие реактивных сопротивлений создает в цепи разность фаз между напряжением и током. На векторной диаграмме $U$ и $I$ образуют между собой угол $\varphi$. Тогда мощность, выделяющаяся во внешней цепи:

$$P = UI\cos\varphi\ . \tag{19}$$

3. Метод исследования и описание установки.

В настоящей работе необходимо собрать электрическую цепь, измерить значение силы тока в цепи, значения напряжений на элементах цепи и внешнего напряжения. Схема лабораторной установки приведена на рис. 3. Она состоит из набора элементов ($R$, $L$ и $C$) и двух электроизмерительных приборов – миллиамперметра и вольтметра. Электрическая схема собирается из элементов с помощью штекеров-перемычек, соединяющих данные элементы между собой. Если в гнезде нет штекера, то в данном месте цепь разомкнута. Миллиамперметр включён в цепь постоянно. Подключение вольтметра к элементам цепи осуществляется с помощью переключателя, выведенного на переднюю панель. На переднюю панель выведен кнопочный выключатель, который в исходном положении размыкает электрическую цепь. При проведении измерений электрическую цепь следует подключать к внешнему источнику, при этом кнопку следует нажать и не отпускать до окончания измерения.

Следует отметить, что электроизмерительные приборы позволяют определить *эффективные* значения измеряемых величин.

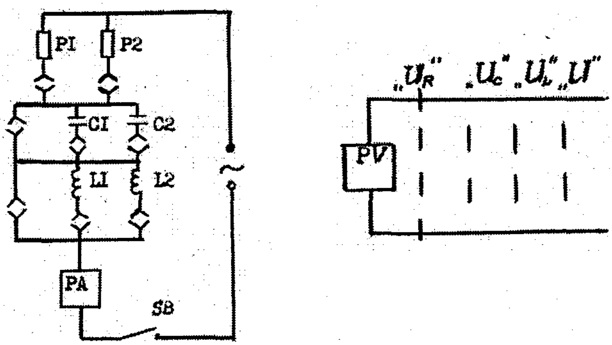



Рис. 3. Принципиальная схема лабораторной установки.

R1, R2 – сопротивления;
C1, C2 – конденсаторы;
L1, L2 – катушки;
PA – амперметр;
PV – вольтметр;
SB – кнопочный выключатель.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Соберите электрическую схему.

4.2. После проверки схемы лаборантом включите её в сеть.

4.3. Измерьте силу тока в цепи $I$.

4.4. Измерьте напряжение на всех элементах цепи ($U_R$, $U_C$, $U_L$) и суммарное напряжение (напряжение в сети) во всей цепи ($U$).

4.5. Измерьте частоту переменного тока $f$ в цепи.

4.6. Результаты измерений запишите в таблицу.

*Таблица*

| $I$, mA | $U_C$, В | $U_L$, В | $U_R$, В | $U$, В | $f$, Гц |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

5. Обработка результатов измерений.

5.1. Рассчитайте амплитудные значения силы тока $I_m$ и напряжений $U_m$ для всех измеренных величин по формуле (6).

5.2. Рассчитайте систематические погрешности миллиамперметра $\Theta$(A) и вольтметра $\Theta$(B) и частотометра $\Theta$ ($f$) по формуле (4*). (Для миллиамперметра $h$ = 1,0 мА, $C_{min}$= 2,0 мА; для вольтметра $h$ = 1,5 В, $C_{min}$= 2,0 В; для частотометра $h$ = 0,05 Гц, $C_{min}$= 0,1 Гц). Считать, что абсолютные погрешности $\Delta I, \Delta U$, $\Delta f$ эффективных и амплитудных значений токов, напряжений и частоты переменного тока равны их систематическим погрешностям.

5.3. Определите абсолютную погрешность амплитудного напряжения:

$$\Delta U_m = \sqrt{\Delta U_R^2 + \Delta U_L^2 + \Delta U_C^2} .$$

5.4. На миллиметровой бумаге в выбранном масштабе постройте векторную диаграмму (см. рис.2). Для этого отложите вверх по оси $y$ значение $U_{Lm}$. Из конца полученного отрезка отложите вниз значение $U_{Cm}$, а по оси $x$ – значение $U_{Rm}$. Проведите $U_m$. Рассчитайте значение $U_m$ по формуле (15) и сравните со значением $U_m$, полученным по формуле (6). Если эти значения отличаются меньше чем на $\pm\ \Delta U_m$, то второй закон Кирхгофа выполняется.

5.5. Вычислите значения активных и реактивных сопротивлений $R$, $X_C$ и $X_L$ и полный импеданс цепи $Z$ по формулам (7), (8), (9), (17).

5.6. Рассчитайте значение индуктивности $L$ и ёмкости $C$ элементов цепи по формулам (10), (11).

5.7. Найдите значение $\cos\varphi$ по формуле (16).

5.8. Рассчитайте мощность электрического тока $P$, выделяющегося во внешней цепи по формуле (19).

5.9. Определите абсолютные погрешности $\Delta R$, $\Delta X_L$, $\Delta X_C$ и $\Delta Z$. Для этого вначале найдите частные относительные погрешности:

$$\delta U_R = \frac{\Delta U_R}{U_R}; \quad \delta U_L = \frac{\Delta U_L}{U_L}; \quad \delta U_C = \frac{\Delta U_C}{U_C}; \quad \delta I = \frac{\Delta I}{I}.$$

Затем определите относительные погрешности:

$$\delta R = \sqrt{\delta U_R^{\,2} + \delta I^2}\ ; \quad \delta X_L = \sqrt{\delta U_L^{\,2} + \delta I^2}\ ; \quad \delta X_C = \sqrt{\delta U_C^{\,2} + \delta I^2}\ .$$

и, наконец, окончательно абсолютные погрешности:

$$\Delta R = R\delta R\ ; \quad \Delta X_L = X_L \delta X_L; \quad \Delta X_C = \delta X_C X_C.$$

$$\Delta Z = \sqrt{\Delta R^2 + \Delta X_L^{\,2} + \Delta X_C^{\,2}}\ .$$

5.10. Определите абсолютные погрешности $\Delta C$ и $\Delta L$.

Для этого найдите частные относительные погрешности:

$$\delta\pi = \frac{\Delta\pi}{\pi}; \qquad \delta f = \frac{\Delta f}{f}.$$

Затем рассчитайте относительные погрешности:

$$\delta C = \sqrt{\delta\pi^2 + \delta f^2 + \delta X_C^{\,2}}\ ; \quad \delta L = \sqrt{\delta\pi^2 + \delta f^2 + \delta X_L^{\,2}}\ ,$$

и абсолютные погрешности:

$$\Delta C = C\delta C\ ; \quad \Delta L = L\delta L\ .$$

5.11. Определите абсолютную погрешность $\Delta\cos\varphi$.

Сначала найдите относительную погрешность:

$$\delta\cos\varphi = \sqrt{\delta U_R^{\,2} + \delta U^2}\ , \quad \text{где} \quad \delta U = \frac{\Delta U}{U},$$

и окончательно абсолютную погрешность:

$$\Delta\cos\varphi = \cos\varphi\,\delta\cos\varphi\ .$$

5.12. Определите абсолютную погрешность мощности электрического тока, выделяющуюся во внешней цепи.

Сначала найдите относительную погрешность:

$$\delta P = \sqrt{\delta I^2 + \delta U^2 + \delta \cos\varphi^2} \ ,$$

и, наконец, абсолютную погрешность:

$$\Delta P = P\delta P \, .$$

5.13. Запишите окончательные результаты всех вычисленных величин.

## 6. Контрольные вопросы.

6.1. Чем отличаются активное и реактивное сопротивления?
6.2. Как построить график - векторную диаграмму и что она позволяет определить?
6.3. Что характеризует величина $\cos\varphi$?

## 7. Литература.

7.1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1978.– Т.2.– §§ 88, 91, 92.

## *Лабораторная работа № 226*
## *ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА*

1. Задачи работы.

1.1. Измерение полной мощности и построение графика ее зависимости от силы тока.

1.2. Измерение полезной мощности и построение графика ее зависимости от силы тока.

1.3. Измерение коэффициента полезного действия источника тока и построение графика его зависимости от силы тока.

1.4. Измерение внутреннего сопротивления источника тока.

2. Предварительные сведения.

Как известно, закон Ома для замкнутой цепи (рис. 1) имеет вид:

$$I = \frac{E}{R + R_I}, \qquad (1)$$

где $I$ – сила тока в цепи, $R$ – сопротивление нагрузки, $R_I$ – внутреннее сопротивление источника тока, $E$ – электродвижущая сила (ЭДС) источника тока.

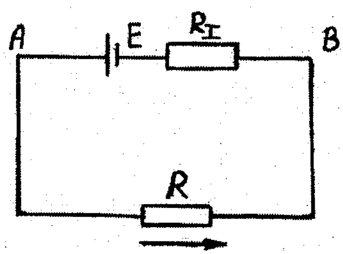



Рис. 1. Замкнутая цепь с источником тока.

ЭДС – энергетическая характеристика источника тока. Она численно равна работе сторонних сил по перенесению единичного положительного заряда по замкнутой цепи. В зависимости от типа источника тока сторонние силы имеют разную природу. Они могут быть обусловлены химическими процессами, внешними излучениями, диффузией носителей тока в неоднородной среде или через границу двух разнородных веществ и т. д.

В замкнутой электрической цепи выделяют внутреннюю цепь, включающую источник тока, и внешнюю цепь, включающую элементы нагрузки (на схеме нагрузкой является сопротивление $R$). Так как любой источник постоянного тока имеет две характеристики: электродвижущую силу ($E$) и внутреннее сопротивление ($R_I$), то на электрических схемах эквивалентное изображение источника тока также включает два элемента (участок АВ на схеме). Как видно из рисунка, напряжение на источнике тока (между точками А и В) равно напряжению на сопротивлении R, которое можно рассчитать по формуле:

$$U_{AB} = U_R = IR = \frac{ER}{R + R_I} = \frac{E}{1 + \frac{R_I}{R}}. \qquad (2)$$

С другой стороны:

$$U_{AB} = E - U_I = E - IR_I,$$

где $U_I$ – напряжение на внутреннем сопротивлении $R_I$.

Из формулы (2) видно, что величина $U_{AB}$ принимает максимальное значение $U_{AB} = E$ при разомкнутой внешней цепи, когда $R \to \infty$; при этом сила тока в цепи $I \to 0$. Максимальное значение силы тока $I_{\max}$ в цепи можно получить, когда клеммы источника тока (точки А и В) замкнуты проводником, сопротивление которого равно нулю ($R = 0$). Величину $I_{\max}$ называют "током короткого замыкания" и она равна:

$$I_{\max} = \frac{E}{R_I}.$$

При коротком замыкании величина $U_{AB}$ обращается в нуль.

Мощность, выделяющуюся во внешней цепи (иначе ее называют полезной мощностью), можно найти по формуле:

$$P_R = IU_R. \qquad (3)$$

Полная мощность, выделяющаяся в цепи, складывается из мощностей, выделяющихся на внешнем $P_R$ и на внутреннем $P_I$ сопротивлениях:

$$P = P_R + P_I. \tag{4}$$

Используя формулы (3) и (4), получаем:

$$P = IU_R + IU_I = I(U_R + U_I),$$

и окончательно:

$$P = I \cdot E \tag{5}$$

Коэффициентом полезного действия источника тока называется отношение полезной мощности к полной:

$$K = \frac{P_R}{P}. \tag{6}$$

Подставляя в выражение (6) уравнения (3) и (5), получим:

$$K = \frac{U_R}{E}. \tag{7}$$

3. Метод исследования и описание установки.

В работе исследуется электрическая цепь с источником постоянного тока, изображенная на рис. 2.

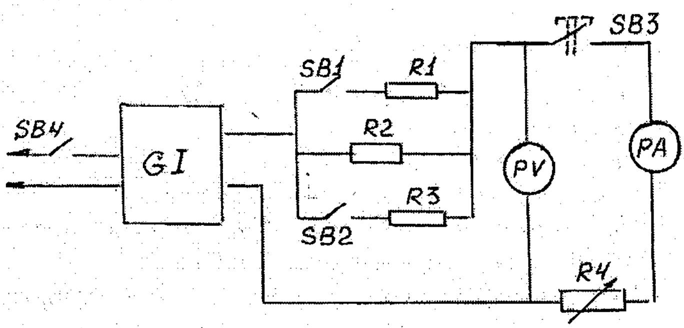



Рис. 2. Принципиальная схема электрической установки.

Перед началом работы установите переключатели SB1 и SB2 в положение, соответствующее своему варианту.

В исходном положении выключатель SB3 разомкнут, и вольтметр PV показывает величину ЭДС источника тока E. При нажатии кнопочного выключателя SB3 цепь замыкается, и вольтметр, подключенный к источнику тока G1, покажет напряжение на нагрузке $U_R$. Одновременно следует измерить силу тока в цепи I миллиамперметром PA.

Для построения зависимостей величин $P_R$, $P$ и $K$ от силы тока $I$ измерения напряжения и силы тока следует проводить не менее 10 раз во всем диапазоне изменения величины силы тока. Расчет величин $P_R$, $P$ и $K$ следует производить по формулам (3), (5), (7) соответственно.

Уравнение (7) для величины $K$ представляет зависимость этой величины от напряжения, а не от силы тока, и его следует преобразовать к виду

$$K=\frac{U_R}{E}=\frac{E-U_{R_I}}{E}=\frac{E-IR_I}{E}=1-\frac{R_I}{E}I\,. \qquad (10)$$

Из этого уравнения видно, что $K$ является линейной функцией $I$, причем угловой коэффициент линейной зависимости $a$ связан с $R_I$ соотношением:

$$a=-\frac{R_I}{E}\,. \qquad (11)$$

Отсюда:

$$R_I=-aE\,. \qquad (12)$$

3. Порядок выполнения работы.

3.1. Поставьте переключатели SB1 и SB2 в положение, соответствующее вашему варианту.

3.2. Включите тумблер SB4 "СЕТЬ".

3.3. Измерьте значение ЭДС источника тока.

3.4. Переведите потенциометр "ТОК" в нижнее положение. В этом положении сила тока в цепи максимальна.

3.5. Проведите измерения силы тока в цепи I и напряжения на нагрузке $U_R$ при разных положениях регулятора потенциометра "ТОК". Всего следует выбрать 8-10 равноотстоящих значений силы тока в цепи. Измерения следует проводить при нажатой кнопке SB3. Данные измерений занесите в таблицу 1.

*Таблица 1*

| № | $I$, мА | $U_R$, В | $E$, В |
|---|---|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

4. Обработка результатов измерений.

4.1. По данным прямых измерений определите значения величин $P_R$, $P$ и $K$ по формулам (3), (5), (7). Результаты расчета занесите в таблицу 2.

*Таблица 2*

| № | $I$, мА | $\Delta I$, мА | $U_R$, В | $\Delta U_R$, В | $P$, Вт | $\Delta P$, Вт | $P_R$, Вт | $\Delta P_R$, Вт | $K$, % | $\Delta K$, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

4.2. Рассчитайте систематические погрешности результатов прямых измерений: $\Theta(U)$ и $\Theta(I)$ по формуле (4*). (Для вольтметра $h = 0{,}15$ В, $C_{min}= 0{,}2$ В. Для миллиамперметра: в пределах измерений от 0 до 200 мА $h = 1{,}0$ мА, $C_{\min}= 2{,}0$ мА; от 0 до 100 мА $h = 0{,}5$ мА, $C_{\min}= 1{,}0$ мА; от 0 до 50 мА $h = 0{,}25$ мА, $C_{\min}= 0{,}5$ мА).

4.3. Абсолютные погрешности $\Delta I$, и $\Delta U_R$ определяются систематическими погрешностями, а $\Delta E = \Delta U_R$.

4.4. Для расчёта абсолютных погрешностей $\Delta P, \Delta P_R$ и $\Delta K$ сначала рассчитайте частные относительные погрешности:

$$\delta E = \frac{\Delta E}{E}; \quad \delta I = \frac{\Delta I}{I}; \quad \delta U_R = \frac{\Delta U_R}{U_R}.$$

Затем относительные погрешности:

$$\delta P = \sqrt{\delta I^2 + \delta E^2}; \quad \delta P_R = \sqrt{\delta I^2 + \delta U_R{}^2}; \quad \delta K = \sqrt{\delta U_R{}^2 + \delta E^2}.$$

И, наконец, найдите абсолютные погрешности:

$$\Delta P = P\delta P; \quad \Delta P_R = P\delta P_R; \quad \Delta K = K\delta K.$$

4.5. По данным таблицы 2 постройте графики зависимостей $P = f_1(I)$, $P_R = f_2(I)$, $K = f_3(I)$.

5. Обработка графика $K = f_3(I)$.

5.1. Из графика зависимости $K = f_3(I)$ найдите значения углового коэффициента $a$ и $\Delta a$ по формулам (9*), (10*).

5.2. Вычислите значение внутреннего сопротивления по формуле:

$$R_I = -aE.$$

5.3. Для определения абсолютной погрешности $\Delta R_I$ сначала найдите частную относительную погрешность:

$$\delta a = \frac{\Delta a}{a}.$$

Затем относительную погрешность внутреннего сопротивления:

$$\delta R_I = \sqrt{\delta a^2 + \delta E^2},$$

и окончательно:

$$\Delta R_I = R_I \cdot \delta R_I.$$

5.4. Запишите окончательный результат измерения внутреннего сопротивления источника тока.

6. Контрольные вопросы.

6.1. Какова физическая природа сторонних сил?
6.2. Что такое ЭДС?
6.3. Что такое ток короткого замыкания?
6.4. Чем отличается полная и полезная мощность?
6.5. Как зависят полная и полезная мощность от силы тока в цепи?
6.6. Как зависят полная и полезная мощность от сопротивления нагрузки?
6.7. При каком сопротивлении нагрузки $P_R$ достигает максимального значения?

## *Лабораторная работа № 301*

## *ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА*

1. Задача работы.

1.1. Определение радиуса кривизны линзы.

2. Предварительные сведения.

С точки зрения волновой теории, свет – это электромагнитная волна, т.е. электромагнитное поле, распространяющееся в вакууме со скоростью $c = 3\cdot10^8$ м/с. Электромагнитное поле характеризуется векторами напряженности электрического $\vec{E}$ и магнитного полей $\vec{H}$. Эти векторы колеблются по синусоидальному закону перпендикулярно друг другу и перпендикулярно вектору скорости $\vec{c}$.

Интерференция света – это сложение когерентных волн, в результате которого происходит уменьшение или увеличение амплитуды результирующего колебания, и, следовательно, усиление или ослабление интенсивности света.

Условие максимума – разность хода равна четному числу длин полуволн:

$$\Delta = 2k\frac{\lambda}{2}, \text{ где } k = 0, 1, 2, 3, \ldots \qquad (1)$$

Условие минимума – разность хода равна нечетному числу длин полуволн:

$$\Delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, \text{ где } k = 0, 1, 2, 3, \ldots, \qquad (2)$$

где $\Delta = (y_2 - y_1)$ – называется разностью хода, а $y_1$ и $y_2$ – пути, пройденные волнами к моменту времени $t$.

Разность хода может возникнуть, даже если лучи проходят один и тот же геометрический путь $l$. Дело в том, что для световых лучей характерен оптический путь. Оптическим путем называется произведение геометрического пути $l$ на показатель преломления $n$ среды: $y = l\cdot n$.

Устойчивую интерференционную картину могут дать только когерентные волны, т.е. волны, частоты колебаний которых одинаковы, а разность фаз сохраняется постоянной в течение времени наблюдений.

Все искусственные и естественные источники света (за исключением лазеров) излучают некогерентные волны.

Когерентные волны можно получить разделением одного луча от одного источника на два когерентных луча. Практически это может быть осуществлено с помощью различных оптических систем: щелей, зеркал, тонких пленок и линз.

3. Метод исследования и описание установки.

В данной работе интерферируют волны, отраженные от верхней и нижней поверхности воздушного зазора, образованного выпуклой поверхностью линзы малой кривизны, соприкасающейся с плоской поверхностью хорошо отполированной пластины. Этот зазор постепенно утолщается от точки их соприкосновения к краям (рис. 1).

На плоскую поверхность линзы падает перпендикулярно пучок параллельных лучей монохроматического света длиной волны $\lambda$. Часть света отражается от верхней поверхности $AC$ воздушного зазора, часть – от нижней поверхности $BC$.

По мере удаления к краям линзы, с увеличением толщины воздушного слоя растет и разность хода интерферирующих лучей, которая будет поочередно давать четное и нечетное число длин полуволн (см. формулы (1) и (2)). В результате образуются концентрические светлые и темные кольца, называемые кольцами Ньютона.

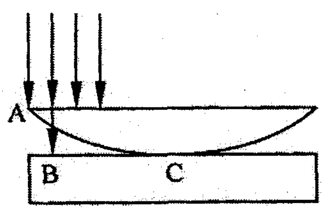



Рис. 1.

Радиусы темных колец Ньютона (в отраженном свете) определяются формулой:

$$r_k = \sqrt{kR\lambda},$$

где $R$ – радиус кривизны линзы; $\lambda$ – длина волны; $k = 1,2,3\ldots$

Возведем в квадрат левую и правые части, и с учетом того, что $r_k = \dfrac{D_k}{2}$ ($D_k$ – диаметр кольца), получаем:

$$D_k^2 = 4R\lambda k.$$

При данной линзе и определенной длине волны это соотношение является линейной зависимостью квадрата диаметра $D_k^2$ $k$-ого темного кольца от номера кольца $k$ с угловым коэффициентом $a = 4R\lambda$..

Отсюда:

$$R = \frac{a}{4\lambda}. \qquad (3)$$

Формула (3) является рабочей формулой для вычисления радиуса кривизны линзы $R$.

Схема установки представлена на рис. 2.

Плосковыпуклую линзу, положенную выпуклой стороной на плоскопараллельную пластину и плотно к ней прижатую, помещают на столик микроскопа М, который может перемещаться в горизонтальной плоскости. Над системой «линза-пластинка» укреплено стекло G, которое может вращаться вокруг горизонтальной оси. Оно служит для направления лучей от источника света на линзу. В качестве источника света использована электрическая лампа L со светофильтром.

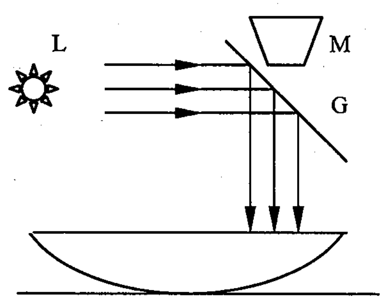



Рис. 2.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Добейтесь наибольшей освещенности поля зрения в микроскопе, поворачивая стекло G около своей оси.

4.2. Сфокусируйте интерференционную картину, медленно перемещая тубус микроскопа вверх и вниз.

4.3. Осторожно перемещайте линзу с пластиной до тех пор, пока центральное темное пятно не окажется в центре поля зрения. (Биштрих на шкале микроскопа должен находиться при этом около четвертого деления. Биштрих – двойной штрих, перемещающийся вдоль шкалы при вращении барабана.)

4.4. Измерьте диаметры первых шести темных колец, учитывая, что кольца Ньютона имеют конечную ширину. Поэтому при измерении диаметра надо устанавливать перекрестие нитей окуляра микроскопа на середину темной полосы соответствующего кольца. Измерение диаметров производите в следующем порядке:

а) установите перекрестие нитей окуляра микроскопа на середину полосы последнего из измеряемых колец, т.е. шестого. Произвести отсчет.

Количество целых делений указывает биштрих. Доли деления отсчитывают по барабану. Например, если биштрих находится между вторым и третьим делениями шкалы, а на барабане отсчитали 38 делений. То отсчет соответствует 3,38 дел. Результат отсчета занесите в таблицу в графу $A$;

б) установите перекрестие нитей на конец диаметра пятого, четвертого и всех последующих колец. Произведите отсчет;

в) переведите нить через центральное темное пятно и подведите ее на середину первого, второго и всех последующих колец. Результаты занесите в таблицу в графу $B$. Запись ведите снизу вверх, чтобы она соответствовала номеру измеряемого кольца.

*Таблица*

| номер кольца | $A$ | $B$ | $A–B$ | $D_k$, мм | $D_k^2$, мм$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 6<br>5<br>4<br>3<br>2<br>1 | | | | | |

5. Обработка результатов измерений.

5.1. Вычислите абсолютные погрешности величин $A$ и $B$, полученных в результате прямых измерений. Они определяются систематической погрешностью по формуле (4*). (Предельная погрешность $h$ окулярного микрометра МОВ-1 равна 0,01 мм, цена минимального деления $C_{\min}$= 0,01 мм).

Таким образом:

$$\Delta A = \Delta B = \Theta(A) = \Theta(B).$$

5.2. Рассчитайте диаметры колец и их погрешности по формулам:

$$D_k = \frac{A - B}{4{,}52};$$

$$\Delta D_k = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{4{,}52}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{4{,}52}\right)^2}.$$

Значения $D_k$ занесите в таблицу.

5.3. Рассчитайте квадраты диаметров $D_k^2$ для каждого кольца. Абсолютные погрешности значений $D_k^2$ определяются по формуле:

$$\Delta D_k^2 = 2D \cdot \Delta D.$$

5.4. Постройте график зависимости $D_k^2$ от $k$, где $k$ – номер кольца.

(На графике для каждой экспериментальной точки отобразите в масштабе погрешности $\Delta D_k^2$).

5.5. По графику найдите угловой коэффициент $a$ и его абсолютную погрешность $\Delta a$ по формулам (9*), (10*). Необходимо учесть, что $D_k^2$ исчисляется в мм$^2$ и для расчета $a$ размерность необходимо перевести в систему СИ (т.е. в м$^2$).

5.6. Вычислите радиус кривизны линзы $R$ по формуле (9). Значение длины волны $\lambda = (6{,}0 \pm 0{,}5) \cdot 10^{-7}$ м.

5.7. Рассчитайте погрешность радиуса кривизны линзы:

$$\delta R_a = \frac{\Delta a}{a}; \quad \delta R_\lambda = \frac{\Delta \lambda}{\lambda};$$

$$\delta R = \sqrt{\delta R_a^2 + \delta R_\lambda^2};$$

$$\Delta R = R \cdot \delta R.$$

5.8. Запишите окончательный результат измерения радиуса кривизны линзы.

## 6. Контрольные вопросы.

6.1. Какие волны называются когерентными?
6.2. Дайте определение явлению интерференции.
6.3. Как меняется длина световой волны при переходе света из вакуума в среду с показателем преломления $n$?
6.4. Что называется оптической длиной пути. Оптической разностью хода лучей?
6.5. В каком случае происходит «потеря» половины длины волны?
6.6. Сформулируйте условия максимума и минимума при интерференции.
6.7. Опишите установку, позволяющую наблюдать кольца Ньютона.

## 7. Литература.

7.1. *Зисман Г.А., Тодес О.М.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1965. – т.3, гл. 3, §10-12.
7.2. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1998. – т.2, гл.5, §119-122.
7.3. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука. Физматлит. – 1996.- гл.1.4 - § 1.4.1. – 1.4.4.
7.4. *Сивухин Д.В.* Курс общей физики. Оптика. // М.: Наука, 1980. – гл.3, – §26, 27, 33 – с.188 – 235.

## *Лабораторная работа № 306*
## *ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ВОЛЬФРАМА*

1. Задача работы.

1.1. Определение степени «черноты» (степени отклонения излучения данного тела от излучения абсолютно черного тела) вольфрама и исследование ее зависимости от температуры.

2. Предварительные сведения.

*Абсолютно черным телом* (а.ч.т.) называют тело, поглощающее весь падающий на него поток излучения независимо от спектрального состава излучения и от температуры а.ч.т.

Закон распределения спектральной мощности равновесного излучения, испускаемого единицей поверхности а.ч.т. в зависимости от температуры, выражается формулой Планка:

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{(e^{hc/\lambda kT} - 1)}, \qquad (1)$$

где: $E_{\lambda T}$ – спектральная мощность излучения, или *лучеиспускательная способность* а.ч.т. (энергия, испускаемая единицей поверхности тела за единицу времени при данной температуре $T$ и для данной длины волны $\lambda$); $h$ – постоянная Планка; $k$ – постоянная Больцмана; $c$ – скорость света в вакууме; $\lambda$ – длина волны излучения.

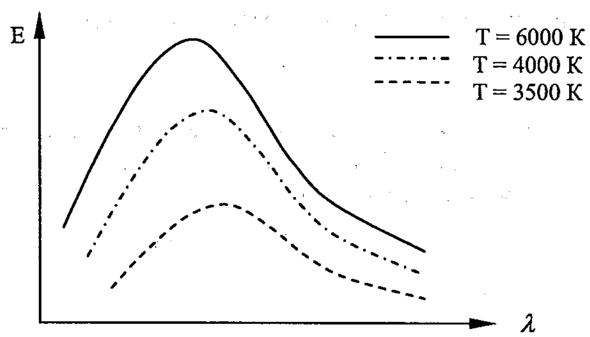



Рис. 1. Зависимость спектральной мощности излучения от длины волны.

Графическая зависимость лучеиспускательной способности а.ч.т. от температуры $E_{\lambda,T} = E_{\lambda,T}(T)$ представлена на рис. 1. Из формулы Планка могут быть получены законы излучения а.ч.т., представленные ниже.

Закон Стефана-Больцмана: *Полная лучеиспускательная способность* а.ч.т. (суммарная энергия, испускаемая единицей поверхности тела за единицу времени при данной температуре во всем интервале длин волн) пропорциональна четвертой степени температуры а.ч.т.:

$$E_T = \sigma\ T^4, \tag{2}$$

где: $\sigma$ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma$ = 5,67·10$^{-8}$ Вт/(м$^2$·К$^4$).

Закон смещения Вина: Длина волны, на которую приходится максимум излучения а.ч.т., обратно пропорциональна абсолютной температуре этого тела:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \tag{3}$$

где: $b$ = 2,898·10$^{-3}$ м·К. При повышении температуры максимум излучения смешается в сторону более коротких волн (см. рис. 1).

Второй закон Вина: Максимальное значение лучеиспускательной способности а.ч.т. прямо пропорционально пятой степени абсолютной температуры этого тела:

$$E_{\lambda_{\max},T} = C\ T^5, \tag{4}$$

где: $C$ = 1,3·10$^{-5}$ Вт/м$^9$·К$^5$.

Если ввести поправку на отличие излучения данного тела от излучения а.ч.т., то полную лучеиспускательную способность $E$ такого нечерного тела можно представить в виде:

$$E = \alpha\ E_T = \alpha\ \sigma\ T^4,$$

где: $\alpha$ – степень черноты, равная отношению полной лучеиспускательной способности $E$ нечерного тела к полной лучеиспускательной способности $E_T$ черного тела:

$$\alpha = \frac{E}{E_T},\ (\alpha \le 1).$$

3. Метод исследования и описание установки.

Схема установки представлена на рис. 2.

В данной работе излучающим телом является нить накала электролампы *Л*, изготовленная из вольфрама. Если площадь нити $S$, то излучаемая мощность:

$$N = SE = S\,\alpha\,\sigma\,T^4. \tag{5}$$

С другой стороны, электрическая мощность $N$, потребляемая лампой, может быть вычислена по формуле:

$$N = I^2 R, \tag{6}$$

где: $I$ и $R$ – соответственно сила тока и сопротивление нити лампы.

Если пренебречь потерями на теплопроводность и нагрев окружающей среды, то мощность, рассчитанную из формулы (5), можно подставить в выражение (6). Тогда искомая степень черноты $\alpha$ окончательно выразится как:

$$\alpha = \frac{I^2\,R}{\sigma\,S\,T^4}. \tag{7}$$

На зависимости $\alpha$ от электрических параметров цепи, в которую включена электролампа (см. формулу (7)), и основан метод определения $\alpha$ в данной работе.

Величины $I$, $R$ и $T$ находятся следующим образом:

Сопротивление $R$ определяется по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I} - r_a, \tag{8}$$

где: $r_a$ – сопротивление амперметра (сила тока и напряжение на лампе измеряются с помощью амперметра и вольтметра).

Температуру нити накала (в градусах Кельвина) можно вычислить, учитывая связь температуры с сопротивлением нити лампы:

$$T(K) = A + B\left(\frac{R}{R_0}\right) + C\left(\frac{R}{R_0}\right)^2, \tag{9}$$

где: $A$, $B$, $C$ – постоянные для вольфрама величины; $R_0$ – сопротивление лампы при $T = 273$ К.

При расчете абсолютной погрешности косвенного измерения величины температуры $\Delta T$ следует учесть, что величинами частных абсолютных погрешностей $\Delta T_A$, $\Delta T_B$, $\Delta T_C$ и $\Delta T_{R_0}$ в данной работе можно пренебречь.

Реостат R включен как потенциометр. Перемещая его движок, можно получить ряд значений $U$ и $I$, вычислить соответствующий ряд $R$, $T$ и $\alpha$ и получить зависимость $\alpha$ от температуры.

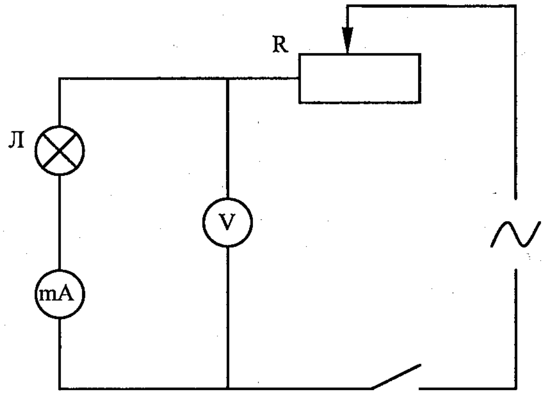



Рис. 2. Схема установки.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. С помощью сопротивления $R$ установите рекомендуемые значения силы тока $I$ (см. таблицу).

4.2. Измерьте напряжение в цепи при каждом значении силы тока. Данные занесите в таблицу.

*Таблица*

| № опыта | $I$, мА | $U$, В | $R$, Ом | $T$, К | $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 50 | | | | |
| 2 | 60 | | | | |
| 3 | 70 | | | | |
| 4 | 80 | | | | |
| 5 | 90 | | | | |
| 6 | 100 | | | | |

5. Обработка результатов измерений.

5.1. Рассчитайте систематические погрешности амперметра $\Theta(I)$ и вольтметра $\Theta(U)$ по формуле (4*). (Для амперметра $h = 0{,}5$ мА,

$C_{min}$= 1,0 мА; для вольтметра $h$ = 1,5 В, $C_{min}$= 2,0 В). Абсолютные погрешности $\Delta I$ и $\Delta U$ равны систематическим погрешностям.

5.2. Вычислите сопротивления $R$ по формуле (8) для каждого $I$ и $U$ и их абсолютные погрешности:

$$\Delta R_U = \frac{\Delta U}{I}; \quad \Delta R_I = \frac{U\Delta I}{I^2}; \quad \Delta R_{ra} = \Delta r_a;$$

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_U^2 + \Delta R_I^2 + \Delta R_{ra}^2}.$$

5.3. Определите температуры $T$ по формуле (9) для каждого $R$ и их погрешности:

$$\Delta T = \left(\frac{B}{R_0} + \frac{2RC}{R_0^2}\right)\Delta R.$$

5.4. Найдите степень черноты $\alpha$ по формуле (7) для каждого $I$ и $U$, и абсолютные погрешности для каждого значения $\alpha$ :

$$\delta\alpha_I = \frac{2\Delta I}{I}; \quad \delta\alpha_R = \frac{\Delta R}{R}; \quad \delta\alpha_T = \frac{4\Delta T}{T};$$

$$\delta\alpha = \sqrt{\delta\alpha_I^2 + \delta\alpha_R^2 + \delta\alpha_T^2}; \quad \Delta\alpha = \alpha \cdot \delta\alpha.$$

5.5. Постройте график зависимости $\alpha = f(T)$.

## 6. Контрольные вопросы.

6.1. Что называется лучеиспускательной способностью?
6.2. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана.
6.3. Как формулируется закон смещения Вина?
6.4. Сформулируйте второй закон Вина.

## 7. Литература.


7.1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М.: Наука, 1974. – т.3, гл., § 30–34.
7.2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1998. – т.5, гл.1, – §1.1 – 1.7 – с.9 – 34.
7.3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука. Физматлит. – 1996.- гл. - § .
7.4. Сивухин Д.В. Курс общей физики. Оптика. // М.: Наука, 1980. – гл.10, – §112 – 119 – с.675 – 708.

## *Лабораторная работа № 312*

## *ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ДЛЯ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ ЯВЛЕНИЯ ЗВУКОВОГО РЕЗОНАНСА*

1. Задача работы.

1.1. Определить показатель адиабаты (отношение $\frac{C_p}{C_V}$) для воздуха.

2. Предварительные сведения.

2.1. Скорость распространения звуковой волны в упругой среде.

Под звуком понимают колебательные движения частиц упругой среды (с частотой примерно 16 – 20000 Гц), распространяющиеся в среде в виде волн, возбуждаемых источником колебаний. В воздухе, как и во всякой газообразной среде, могут распространяться только продольные волны, т.е. волны, при которых колебания частиц среды происходит в направлении, параллельном направлению движению волны. Поэтому распространение звуковых волн в упругой среде сопровождается сжатием и разрежением ее отдельных участков. Поэтому скорость $v$ распространения такой волны должна зависеть от упругих свойств среды.

Локальные сжатия и разрежения, возникающие в газе при прохождении звуковой волны, приводят к изменению температуры различных участков газа. Причем для звуковых волн, имеющих относительно высокую частоту, выравнивание температур отдельных участков не успевает произойти в течение периода колебаний. Следовательно, процессы локального расширения и сжатия могут считаться адиабатическими. (Адиабатический процесс – это процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.) Для таких процессов справедливо уравнение Пуассона:

$$PV^{\gamma} = const\,,$$

где: $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ – показатель адиабаты (коэффициент Пуассона); $C_p$ и

$C_V$ – удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно.

Скорость распространения волны в газовой среде:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}, \tag{1}$$

где $R$ – универсальная газовая постоянная, $T$ – абсолютная температура, $\mu$ – молярная масса газа.

Отсюда показатель адиабаты:

$$\gamma = \frac{v^2 \mu}{RT}. \tag{2}$$

2.2. Стоячая волна. Условие резонанса в трубе с воздухом.

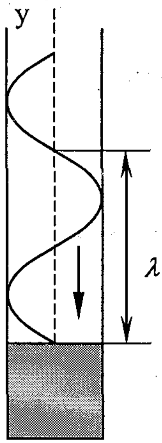
Возбудим каким-либо образом свободные звуковые колебания столба воздуха в стеклянном цилиндре, частично заполненном водой (рис. 1). На границе воздуха с водой произойдет отражение падающей волны. Следовательно, в воздушном столбе падающая (рис. 1. а) и отраженная (рис. 1. б) волны будут налагаться друг на друга и в результате возникнут колебания с характерным расположением чередующихся максимумов и минимумов амплитуды, т.е. возникнет стоячая волна. Очевидно, на границе воздуха с водой колебаниями частиц воздуха будет препятствовать другая более плотная среда (вода). Поэтому у границы будет минимальная амплитуда колебаний, т.е. образуется узел стоячей волны (рис. 2).

Следующие узлы от поверхности воды будут на расстоянии $\frac{\lambda}{2}$, $\lambda$, и т. д. Следовательно, координаты узлов определяются из условия:

$$y = k\frac{\lambda}{2}, \qquad \text{где } k = 0, 1, 3\ldots$$

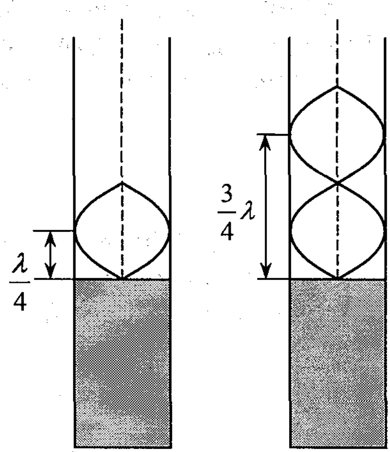
а расстояние между соседними узлами можно вычислить по разности:

$$y_{k+1} - y_k = \frac{\lambda}{2}.$$




*а* *б*

Рис. 1.




*а* *б*

Рис. 2.

Пучностями стоячей волны называются точки, в которых амплитуда максимальна. Первая пучность наблюдается на расстоянии $\frac{\lambda}{4}$ от поверхности (рис 2. а), вторая – на расстоянии $\frac{3}{4}\lambda$ (рис. 2. б) и т. д.

Т.о. расстояние между пучностями равно $\frac{\lambda}{2}$, а расстояние между соседними узлом и пучностью вдвое меньше и равно $\frac{\lambda}{4}$.

Если у открытого края цилиндра образуется пучность стоячей волны, то столб воздуха будет издавать так называемый основной тон, что проявится в усилении звучания воздушного столба. Если увеличить длину воздушного столба на $\frac{\lambda}{2}$, то у открытого края трубы вновь появится пучность. Таким образом, интенсивность звука будет максимальной в тех случаях, когда длина столба $l$ составит нечетное число четвертей длины волны:

$$l = \frac{\lambda}{4}(2k-1). \qquad (3)$$

Свободные колебания, как правило, являются затухающими. В нашем примере для их поддержания можно к открытому концу воздушного столба поднести источник звука с фиксированной частотой. Наливая в сосуд воду, мы слышим, что звук при определенных уровнях воды значительно усиливается. Усиление происходит как раз на тех уровнях, на которых длина воздушного столба $l$ равна нечетному числу четвертей длины волны источника, т.е. выполняется соотношение (3). На этих уровнях происходит совпадение частоты источника с собственной частотой колебаний столба. Это совпадение и служит причиной нарастания амплитуды вынужденных колебаний, т.е. при этом наблюдается явление резонанса – явление резкого возрастания амплитуды установившихся вынужденных колебаний, наступающее при приближении частоты внешнего гармонического воздействия к частоте собственных колебаний.

3. Метод исследования и описание установки.

В данной работе значение $\gamma$ для воздуха определяется методом звукового резонанса.

Как следует из соотношения (3), минимальная высота столба $l_1$, при которой наблюдается резонанс, равна $\frac{\lambda}{4}$. Другие высоты столба, при которых наблюдается резонанс на той же частоте, удовлетворяют формуле:

$$l_k = l_1 + \frac{k\lambda}{2}, \tag{4}$$

где: $\lambda = \frac{v}{\nu}$ – длина волны (см. рис. 1); $v$ – скорость; $\nu$ - частота; $k = 1, 2, 3,$ – порядковый номер наблюдаемого резонанса.

Отсюда можно получить длину волны:

$$\lambda = \frac{2(l_k - l_1)}{k-1}. \tag{5}$$

В данной работе звуковые колебания столба воздуха поддерживаются звуковым генератором, испускающим колебания с фиксированной частотой. Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.

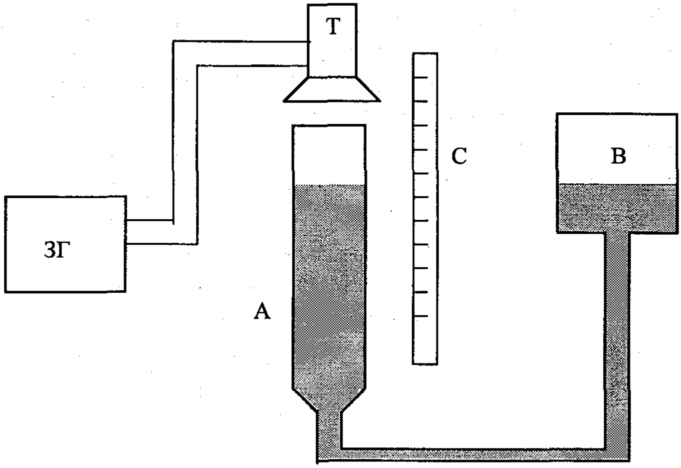



Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

Кроме звукового генератора, в нее входит стеклянный цилиндр А, соединяющийся резиновой трубкой с подвижным сосудом В. Цилиндр снабжен шкалой С, разделенной на сантиметры. Над цилиндром *А* укреплен телефон Т, соединенный с генератором звука. Двигая по вертикали сосуд В, можно изменять уровень воды в цилиндре А и тем самым длину воздушного столба над поверхностью воды.

4. Порядок выполнения работы.

4.1. Включите генератор, установите на нем частоту $\nu = 1000$ Гц (значение по шкале 100 Гц и множитель x10).

4.2. Сосуд с водой поднимите в верхнее положение (уровень воды в трубе установится около отметки 15 см).

4.3. Опуская сосуд с водой и улавливая на слух моменты резонанса (максимальной громкости звука), определите по шкале *С* величины $l_k$, соответствующие каждому *k*-тому резонансу, где $k \leq 4$. Измерения повторите несколько раз. Данные наблюдений занесите в таблицу.

4.4. Измерьте температуру воздуха *Т* в лаборатории.

*Таблица*

| № опыта | $l_1$, см | $l_2$, см | $l_3$, см | $l_4$, см | $T$, К |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

5. Обработка результатов измерений.

5.1. Рассчитайте систематическую погрешность $\theta(l)$, средние значения $\overline{l_k}$ для каждого столбца, случайные погрешности $\varepsilon(l_k)$ и абсолютные погрешности $\Delta l_k$ по формулам (4*), (2*), (3*), (6*) из приложения. (Предельная погрешность линейки $h$ = 1 мм, $C_{min}$ = 1 мм).

Переведите температуру воздуха из градусов Цельсия в градусы Кельвина:

$$T = t\,(^oC) + 273.$$

Абсолютная погрешность температуры $\Delta T = 0{,}5$ К.

5.2. Постройте график линейной зависимости $\overline{l_k} = f(k)$. Определите значение углового коэффициента $a$ и его абсолютную погрешность $\Delta a$ по формулам (9*) и (10*). (При расчете необходимо перевести сантиметры в метры).

5.3. Найдите длину звуковой волны:

$$\lambda = 2a,$$

и ее абсолютную погрешность:

$$\Delta\lambda = 2\Delta a.$$

5.4. Рассчитайте скорость звука в воздухе по формуле:

$$V = \upsilon\lambda,$$

где $\upsilon = (1000.0 \pm 0{,}5)$ Гц.

5.5. Рассчитайте абсолютную погрешность скорости звука. Для этого сначала вычислите относительную погрешность:

$$\delta V = \sqrt{\delta V_\nu^2 + \delta V_\lambda^2}\,, \quad \text{где} \quad \delta V_\nu = \frac{\Delta\upsilon}{\upsilon}; \quad \delta V_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}.$$

А затем абсолютную погрешность:

$$\Delta V = V \cdot \delta V .$$

5.6. Вычислите показатель адиабаты $\gamma$ по формуле (2).

5.7. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности по формулам:

$$\delta\gamma_V = \frac{2\Delta V}{V}; \quad \delta\gamma_R = \frac{\Delta R}{R}; \quad \delta\gamma_T = \frac{\Delta T}{T};$$

$$\delta\gamma = \sqrt{\delta\gamma_V^2 + \delta\gamma_R^2 + \delta\gamma_T^2}\,; \quad \Delta\gamma = \gamma \cdot \delta\gamma .$$

5.8. Запишите окончательный результат.

## 6. Контрольные вопросы.

6.1. Какие волны называются продольными, поперечными?

6.2. Как связана скорость распространения звуковой волны с упругими свойствами среды?

6.3. Почему можно применять уравнение адиабатического процесса для газа, в котором распространяется звук?

6.4. Как образуется стоячая волна в столбе воздуха в данном опыте?

6.5. В чем заключается явление резонанса?

## 7. Литература.

7.1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М.: Наука, 1974. – т.1, гл.3, п.п. 10, 11.

7.2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1998. – т.1, гл.5, п.п. 38-43.

7.3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука. Физматлит. – 1996.- гл.1.4 - § 1.4.1. – 1.4.4.

## *Приложение*

# *ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН*

1. *Прямые и косвенные измерения.* В результате каждого отдельного измерения (наблюдения) получают численное значение измеряемой величины. Различают два типа измерений физических величин: прямые и косвенные.

В *прямых измерениях* значение физической величины определяется непосредственно с помощью прибора, измеряющего эту величину. Таковы измерения длины линейкой или штангенциркулем, силы тока – амперметром, времени – секундомером, давления – барометром и т.д.

Часто прямое измерение физической величины оказывается слишком трудоемким или невозможным. Тогда определяемую величину вычисляют по известной из теории формуле, в которую подставляют результаты прямых измерений. Такой метод измерения называется *косвенным*.

Например, для определения плотности $\rho$ твердого тела достаточно путем прямых измерений определить его массу $m$ и объем $V$, а затем рассчитать плотность по формуле $\rho = \frac{m}{V}$. Методов прямого измерения этой величины нет.

Таким образом в зависимости от выбора метода измерений значения некоторых физических величин можно определить путем как прямых, так и косвенных измерений.

2. *Абсолютная и относительная погрешности.* Опыт показывает, что всякому измерению сопутствует неизбежная погрешность, поскольку источники ошибок присущи самому процессу измерения. При измерении может быть получен лишь *приближенный* результат, процесс измерения должен завершаться определением точности и достоверности найденного значения измеряемой величины.

Результат измерения какой-либо физической величины $x$ представляют как

$$x = x_{наил} \pm \Delta x\,, \tag{1}$$

где $x_{наил}$ – *наилучшая оценка*, принимаемая за результат измерения $x$; $\Delta x$ – величина, называемая *абсолютной погрешностью* результата измерения $x$ и имеющая *размерность* этой физической величины.

Выражение (1) означает, что значение измеряемой величины расположено в пределах установленного по наблюдениям интервала $\left(x_{наил} - \Delta x, x_{наил} + \Delta x\right)$.

*Относительной погрешностью* $\delta x$ результата измерения $x$ называется отношение:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{\left|x_{наил}\right|}.$$

В большинстве измерений физических величин абсолютная погрешность $\Delta x$ намного меньше измеряемой величины $x_{наил}$. Поскольку при этом относительная погрешность $\delta x$ представляет собой малое число, ее удобно умножать на 100 и приводить в процентах:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{\left|x_{наил}\right|} \cdot 100\%\,.$$

Чем меньше относительная погрешность измерения, тем точнее оно выполнено.

Если относительная погрешность известна, то абсолютную погрешность можно вычислить по формуле:

$$\Delta x = \delta x \cdot \left|x_{наил}\right|.$$

3. При записи результата измерения в форме (1) следует соблюдать следующие правила:

1) значение погрешности $\Delta x$ округляется до одной (до первой) значащей цифры;

2) численное значение $x_{наил}$ округляется до того же порядка, что и абсолютная погрешность $\Delta x$.

*Пример.* Получен некий результат 12,38 с абсолютной погрешностью 0,573. После округлений получаем $(12{,}4 \pm 0{,}6)$. Результат 526 с погрешностью 42 имеет окончательный вид $(530 \pm 40)$.

## Погрешности результатов прямых измерений

По характеру, происхождению, а также по способам оценки экспериментальные погрешности делятся на случайные и систематические.

1. *Случайные погрешности измерений* обусловлены трудноучитываемыми помехами, влияющими как на измерительные приборы, так и на исследуемый физический объект или процесс. Для определения величины этих погрешностей измерения *одной и той же* физической величины повторяют *несколько раз* в *неизменных условиях* опыта с *одним* исследуемым объектом.

По методу Корнфельда за результат измерения принимают *среднее арифметическое* значение максимального $x_{\max}$ и минимального $x_{\min}$ результата измерений:

$$x_{наил} = \bar{x} = \frac{1}{2}\left(x_{\max} + x_{\min}\right), \qquad (2)$$

а *случайную погрешность* $\varepsilon(x)$ – вычисляют по формуле[2]:

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{2}\left(x_{\max} - x_{\min}\right). \qquad (3)$$

2. *Систематическая (приборная) погрешность измерений* $\Theta(x)$ связана с ограниченной точностью прибора и вычисляется по формуле:

$$\Theta(x) = \sqrt{h^2 + C_{\min}^2}\,, \qquad (4)$$

где $h$ – *предел погрешности* прибора; $C_{\min}$ – *цена минимального деления* шкалы прибора. Предел погрешности $h$ прибора либо определяется по таблице, которая находится в лаборатории, либо рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{K \cdot П}{100}, \qquad (5)$$

---

[2] Более сложный точный метод обработки см. “Обработка результатов измерения физических величин” . Учебное пособие для лабораторного практикума по общей физике/ Фокин С. А. и др. – СПб.: РГГМУ, 1999. – 60с.

где $K$ – класс точности прибора, $П$ – верхний предел измерений прибора (либо данного его диапазона). Применяются следующие классы точности приборов: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Обозначение класса точности прибора указывается на его шкале в виде соответствующих цифр.

3. *Суммарная погрешность* $\Delta x$ результата прямых измерений включает обе составляющие погрешности: случайную $\varepsilon(x)$ и приборную $\Theta(x)$.

Если эти составляющие незначительно различаются по величине, то суммарная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta x = \sqrt{\varepsilon(x)^2 + \Theta(x)^2}\,. \qquad (6)$$

При вычислении $\Delta x$ не требуется высокая точность – вполне достаточно определить эту погрешность с точностью около 20–25 %. Поэтому если $\varepsilon(x)$ и $\Theta(x)$ отличаются в три или более раза, то практически можно считать, что погрешность $\Delta x$ равна большей из них.

4. *Однократные измерения.* В случаях, когда приходится ограничиваться однократным измерением, например, из-за невозможности обеспечить одинаковые условия его проведения, суммарная погрешность принимается равной приборной:

$$\Delta x = \Theta(x).$$

5. *Пример.* Обработка результатов прямых измерений диаметра $D$ цилиндра, выполненных с помощью штангенциркуля.

Значения $D$ для пяти измерений составили: 53,7; 53,0; 52,8; 53,24; 52,8 мм. Определив максимальное ($D_{max}$ =53,7 мм) и минимальное ($D_{min}$ =52,7 мм) значение, проводим расчеты:

$$\overline{D} = \frac{1}{2}\left(D_{max} + D_{min}\right) = \frac{1}{2}\left(53{,}2 + 52{,}7\right) = 52{,}95 \text{ мм},$$

$$\varepsilon(D) = \frac{1}{2}\left(D_{max} - D_{min}\right) = \frac{1}{2}(53{,}2 - 52{,}7) = 2{,}5 \text{ мм}.$$

Полагая, что предел погрешности штангенциркуля равен цене деления его шкалы: $h$ = $C_{min}$= 0,1 мм, вычисляем приборную погрешность штангенциркуля по формуле (4):

$$\Theta(D) = \sqrt{0{,}1^2 + 0{,}1^2} \approx 0{,}14 \text{ мм}.$$

Поскольку приборная погрешность отличается от случайной более чем в 3 раза, то $\Delta D = \varepsilon(D) = 2{,}5$ мм. Окончательная запись результата:

$$D = (53 \pm 3) \text{ мм}.$$

**Погрешности косвенных измерений**

Измерение, при котором значение физической величины рассчитывается с помощью соотношения между ней и другими величинами, полученными в результате прямых измерений, называется *косвенным.*

Математическая запись:

$$\omega = f(x, y, z, ...).$$

Соотношения между физической величиной $\omega$, получаемой при косвенном измерении, и величинами $x, y, z, \ldots$, получаемыми путем прямых измерений, называется *рабочей формулой*. Например, соотношение $S = a \cdot b$ –есть рабочая формула для расчета площади прямоугольника $S$ по результатам прямых измерений длин сторон $a$ и $b$.

Все величины, определяемые путем прямых измерений (например, $x$ и $y$) должны иметь рассчитанные абсолютные погрешности $\Delta x$, $\Delta y$ и представлены в стандартной форме:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x; \qquad y = \bar{y} \pm \Delta y.$$

Кроме измеряемых величин, в рабочую формулу могут входить также величины, которые не измеряются, но значения которых известно. Это, как называемые, табличные величины – известные константы. Обычно погрешность табличной величины принимается равной половине последнего разряда ее значения. Например, если $a = 11{,}3$ мм, то $\Delta a = 0{,}05$ мм, т.е. $a = (11{,}30 \pm 0{,}05)$ мм, а если $a$ = 11 мм, то $\Delta a = 0{,}5$ мм и $a = (11{,}0 \pm 0{,}5)$ мм.

Наилучшим значением величины $\omega$ при ее косвенном измерении будет значение, вычисляемое при подстановке в рабочую формулу средних значений величин $\bar{x},\ \bar{y},\ \bar{z},\ldots$:

$$\bar{\omega} = f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \ldots).$$

Относительная погрешность $\delta\omega$ принимается равной:

$$\delta\omega = \sqrt{\delta\omega_x^2 + \delta\omega_y^2 + \delta\omega_z^2 + \ldots}\,, \tag{7}$$

где $\delta\omega_x = \left|\dfrac{\partial(\ln|f(x,y,z,\ldots)|)}{\partial x}\right| \cdot \Delta x$;

$\delta\omega_y = \left|\dfrac{\partial(\ln|f(x,y,z,\ldots)|)}{\partial y}\right| \cdot \Delta y$ и т.д.

Абсолютная погрешность величины $\omega$:

$$\Delta\omega = \bar{\omega} \cdot \delta\omega \tag{8}$$

Окончательный результат косвенного измерения представляется в форме:

$$\omega = \bar{\omega} \pm \Delta\omega$$

*Пример*: Обработка результатов косвенных измерений.

Определить плотность однородного тела на основании результатов прямых измерений его массы $m = (25{,}4 \pm 0{,}5) \cdot 10^{-3}$ кг и объема $V = (2{,}94 \pm 0{,}05) \cdot 10^{-6}$ м$^3$. Наилучшее значение плотности тела:

$$\bar{\rho} = \frac{m}{V} = \frac{25{,}4 \cdot 10^{-3}}{2{,}94 \cdot 10^{-6}} = 8{,}639 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Частные относительные погрешности по массе и объему:

$$\delta\rho_m = \left|\frac{\partial(\ln|m| - \ln|V|)}{\partial m}\right| \cdot \Delta m = \left|\frac{1}{m}\right| \cdot \Delta m = \frac{0{,}5}{25{,}4} \approx 1{,}97 \cdot 10^{-2},$$

$$\delta\rho_V = \left|\frac{\partial(\ln|m| - \ln|V|)}{\partial V}\right| \cdot \Delta V = \left|\frac{1}{V}\right| \cdot \Delta V = \frac{0{,}05}{2{,}94} \approx 1{,}70 \cdot 10^{-2}.$$

Относительная погрешность плотности:

$$\delta\rho = \sqrt{\delta\rho_m^2 + \delta\rho_V^2} = 10^{-2}\sqrt{3{,}87 + 2{,}89} \approx 0{,}03\,.$$

Абсолютная погрешность плотности:

$$\Delta\rho = \overline{\rho} \cdot \delta\rho = 8{,}639 \cdot 10^3 \cdot 0{,}03 = 225\ \text{кг/м}^3.$$

Округляя значение $\Delta\rho$, запишем окончательный результат:

$$\rho = (8{,}6 \pm 0{,}2) \cdot 10^3\ \text{кг/м}^3.$$

## Правила построения и оформления графиков. Графический анализ линейной зависимости

График выполняется на листе миллиметровой бумаги размером не менее 0,5 формата А4 ($210 \times 297$ мм). Сначала наносят координатные оси: по оси абсцисс откладывают значения независимой переменной (аргумента), по оси ординат – функции. На графике должны быть представлены только те интервалы значений измеряемых величин, которые исследовались в эксперименте. Сам график при этом занимает большую часть поля чертежа.

Рекомендуется выбирать удобные для расчетов и восприятия графика единицы масштаба шкал по осям. Допустимы значения единиц масштаба, равные только *одной, двум* или *пяти* единицам измеряемой физической величины, умноженным, при необходимости, на порядковый множитель $10^{К}$ (К – целое число). Количество делений, около которых приводится соответствующее числовое значение, составляет обычно от 4 до 10. В конце оси указывается буквенное обозначение величины и ее размерность. Стрелки на осях не ставятся. Порядковый множитель $10^{К}$ следует включать в буквенное обозначение, либо использовать десятичные приставки к названиям единиц. Например, $I \times 10^{K}$, А или $I$, мА.

Экспериментальные точки на график следует наносить точно и аккуратно. Погрешности на графиках необходимо указывать для обеих измеряемых величин в виде отрезков, длина которых соответствует абсолютной погрешности.

При проведении кривой по экспериментальным точкам следует учитывать, линия должна быть без резких изломов и перегибов, и проходить так, чтобы экспериментальные точки располагались примерно поровну и в среднем на равном удалении по обе стороны от кривой. Соединение экспериментальных точек ломаной линией *недопустимо*.

Во многих физических экспериментах для описания связи между совместно измеряемыми физическими величинами $x$ и $y$ используется *линейная функция*:

$$y = ax + b\ ,$$

где – $a$ и $b$ – постоянные. Коэффициент $a$ называется угловым коэффициентом. Для вычисления приближенного значения углового коэффициента $a$ нужно произвольно выбрать две расположенные на проведенной прямой точки так, чтобы было удобно считывать их координаты. Начальную точку с координатами ($x_H$, $y_H$) выбирают вблизи наименьшего из измеренных значений $x$, а конечную – с координатами ($x_K$, $y_K$) – вблизи наибольшего. Далее угловой коэффициент $a$ вычисляют по формуле:

$$a = \frac{y_к - y_н}{x_к - x_н}. \qquad (9)$$

Погрешность $\Delta a$ определяют приближенно по формуле:

$$\Delta a = \frac{2\Delta y_{\max}}{|x_к - x_н|}, \qquad (10)$$

где $\Delta y_{\max}$ – максимальное значение абсолютной погрешности экспериментальных точек по оси $y$.

Литература

1. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики: Учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. шк., 1999. – 718 с.
2. *Зайдель А.Н.* Ошибки измерений физических величин. – Л.: Наука, 1974. –106с.
3. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений. Основные положения: ГОСТ 8.207 – 76. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 10с.
4. *Светозаров В.В.* Элементарная обработка результатов измерений. – М.: Изд-во МИФИ, 1983. – 52с.
5. *Свешников А.А.* Основы теории ошибок. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1972. – 122с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

«Ф И З И К А»

курс I, II

*Редактор* О.С. Крайнова
*Компьютерная верстка* Н.И. Афанасьевой

ЛР № 020309 от 30.12.96

Подписано в печать 11.10.10. Формат 60×90 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,6. Тираж 300 экз. Заказ № 50/10
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
ЗАО «НПП «Система», 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1.